

RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 13/06/2025.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Câmpus de Ilha Solteira - SP

TAINÁ FERNANDA GARBELIM PASCOALATO

**INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO
SOLO NA RESPOSTA TRANSITÓRIA EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

Ilha Solteira

2024



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Câmpus de Ilha Solteira - SP

TAINÁ FERNANDA GARBELIM PASCOALATO

**INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO
SOLO NA RESPOSTA TRANSITÓRIA EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

Tese apresentada no Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica.

Área do Conhecimento: Automação

PROF. Dr. SÉRGIO KUROKAWA

Orientador

Ilha Solteira

2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P281i Pascoalato, Tainá Fernanda Garbelim.
Influência das características físicas do solo na resposta transitória em linhas de transmissão / Tainá Fernanda Garbelim Pascoalato. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
178 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2024

Orientador: Sergio Kurokawa

Inclui bibliografia

1. Transitórios eletromagnéticos. 2. Linhas de transmissão. 3. Parâmetros do solo. 4. Dependência da frequência. 5. Teor de umidade. 6. Porosidade. 7. Estratificação do solo.


Amanda Sertori dos Santos

Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Influência das características físicas do solo na resposta transitória em linhas de transmissão


AUTORA: TAINÁ FERNANDA GARBELIM PASCOALATO

ORIENTADOR: SERGIO KUROKAWA


Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Engenharia Elétrica, área: Automação pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **SERGIO KUROKAWA**
Data: 16/12/2024 15:18:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. SERGIO KUROKAWA (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **DAIANA ANTONIO DA SILVA**
Data: 17/12/2024 19:22:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. DAIANA ANTONIO DA SILVA (Participação Virtual)
Instituto Militar de Engenharia

Documento assinado digitalmente
 **EDUARDO COELHO MARQUES DA COSTA**
Data: 16/12/2024 16:01:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. EDUARDO COELHO MARQUES DA COSTA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos / Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Poli-USP

Documento assinado digitalmente
 **JUAN PAULO ROBLES BALESTERO**
Data: 17/12/2024 08:19:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JUAN PAULO ROBLES BALESTERO (Participação Virtual)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP

Prof. Dr. MARCO AURÉLIO DE OLIVEIRA SCHROEDER (Participação Virtual)
Universidade Federal de São João Del-Rei - UFSJ

Ilha Solteira, 13 de dezembro de 2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder forças ao longo desta jornada.

Expresso minha profunda gratidão ao meu esposo, Wellington, por todo o amor, paciência, suporte, conforto, atenção, carinho, preocupação e incentivo em todos os momentos.

À minha família, em especial à minha mãe, Maria Sueli Garbelim, que infelizmente nos deixou este ano, agradeço por sempre acreditar em meu potencial e por todo o amor e cuidado. À minha sogra, Neusa, por ser como uma mãe para mim, ao meu sogro e à minha avó, Ermínia, por sempre desejarem o meu bem.

Agradeço às minhas amigas de residência, Andréia (no Brasil) e Cindy (em Portugal), pelas conversas, pelo apoio e pelos momentos de descontração.

Aos meus amigos Douglas, Thainara, Carol, Juliana e Bruna, agradeço pelas conversas, pelo incentivo contínuo e, acima de tudo, pelo carinho e amizade.

Aos membros do Grupo de Análise em Transitórios Eletromagnéticos (GATE), sou grata pelo apoio e pela disposição em ajudar.

Meus sinceros agradecimentos aos queridos amigos Anderson Ricardo, Gabriel Puerta e Amauri Gutierrez, que constantemente fizeram o possível para me apoiar, ajudar e incentivar.

Aos meus orientadores, Sérgio Kurokawa (no Brasil) e Maria Teresa (em Portugal), agradeço pelo acolhimento, pelo aprendizado e pelo exemplo de dedicação ao longo da orientação.

Agradeço também aos funcionários da UNESP, por todos os serviços prestados, com menção especial a Sandra e Paula, pelo carinho e preocupação.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro, concedido por meio dos processos nº 2020/10141-4 e 2022/09182-3.

Finalmente, agradeço aos membros da banca, Prof^ª Dr^ª Daiana Antonio da Silva, Prof. Dr. Eduardo Coelho Marques da Costa, Prof. Dr. Juan Paulo Robles Balestero e Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder pela disponibilidade e pela cuidadosa avaliação deste trabalho.

“Shine bright and prove them wrong

Cause we can feel our progress”

Stray Kids

RESUMO

Propõe-se aprimorar a modelagem de linhas de transmissão (LTs) para simulações de transitórios eletromagnéticos, com foco na consideração das características físicas do solo, tornando-o mais realista. A pesquisa destaca a influência dos fatores físicos do solo, como o efeito da frequência, teor de umidade, porosidade e estratificação, nas respostas transitórias. O modelo de linha utilizado é o *Universal Line Model* (ULM), implementado nos softwares MATLAB e ATP-EMTP. Com esse intuito, a pesquisa revisa as principais formulações para o cálculo da impedância e admitância do solo, além de comparar os principais modelos disponíveis para incorporar a dependência do solo em função dos fatores físicos. Simulações são realizadas considerando uma configuração com duas LTs trifásicas, geometricamente em paralelo, de 10 km, submetidas à incidência de descarga atmosférica. As tensões transitórias são calculadas considerando duas abordagens: (i) ULM-ATP, considerada como referência, em que o modelo de linha utilizado é o ULM (disponível na versão 7.5 do software ATP-EMTP). Nessa abordagem, a impedância do solo é calculada utilizando a formulação de Carson e a admitância do solo é desprezada. As correntes de deslocamento são negligenciadas e a condutividade do solo é considerada constante. (ii) ULM-implementado, em que o modelo de linha empregado é o ULM, implementado utilizando os softwares MATLAB e ATP-EMTP. Nessa abordagem, a impedância e a admitância do solo são calculadas pela formulação de Wise/Nakagawa, e os parâmetros do solo são dependentes dos fatores físicos. Os resultados mostram que o ULM-implementado, com características realistas do solo incorporadas, produz tensões transitórias com valores de pico mais atenuados em comparação com o ULM-ATP, que gera picos de tensão sobrestimados. Esses resultados demonstram a importância da modelagem realista do solo nas respostas transitórias. Assim, a pesquisa enfatiza que uma modelagem mais precisa do solo é essencial para melhorar a previsibilidade e a eficiência operacional dos sistemas de potência, além de destacar a necessidade de atualização dos softwares de simulação de transitórios eletromagnéticos, visando garantir operações mais seguras.

Palavras-chave: transitórios eletromagnéticos; linhas de transmissão; parâmetros do solo; dependência da frequência; teor de umidade; porosidade.; estratificação do solo.

ABSTRACT

It is proposed to improve the modeling of transmission lines (TLs) for electromagnetic transient simulations, focusing on considering the physical characteristics of the soil, making it more realistic. This research highlights the influence of soil physical factors, such as frequency effects, water content, porosity, and stratification, on the responses generated by transient events. The line model used is the Universal Line Model (ULM), implemented in MATLAB and ATP-EMTP software. To achieve this, the research reviews the main formulations for calculating ground-return impedance and admittance and compares the main models in the literature that incorporate these physical factors. Simulations are performed considering a power system consisting of two parallel overhead transmission lines, each 10 km in length, subjected to lightning strikes. The transient voltages are calculated using two approaches: (i) ULM-ATP, considered the reference, where the line model used is the ULM (available in the recent version of the ATP-EMTP software). In this approach, the ground-return impedance is calculated using Carson's formulation, which neglects ground-return admittance and displacement currents, and soil conductivity is considered constant. (ii) ULM-implemented, in which the line model used is the ULM, implemented using MATLAB and ATP-EMTP software. In this approach, the ground-return impedance and admittance are calculated using the Wise/Nakagawa formulation, and the soil electrical parameters depend on distinct physical factors. The results show that the ULM-implemented model, with incorporated realistic soil characteristics, produces transient voltages with more attenuated peak values compared to the ULM-ATP, which generates overestimated voltage peaks. These results demonstrate the importance of realistic soil modeling in transient responses. Thus, the research emphasizes that more accurate soil modeling is essential to improve the predictability and operational efficiency of power systems and highlights the need for updating EMTP-type software to ensure correct transient responses.

Keywords: electromagnetic transients; transmission lines; soil parameters; frequency dependence; water content; porosity; soil stratification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Tipos de solo no Brasil.	19
Figura 2	Mapa das resistividades do solo no estado de Santa Catarina.	20
Figura 3	Estrutura da tese com os artigos publicados vinculados a cada capítulo.	32
Figura 4	Efeito pelicular em um condutor cilíndrico.	34
Figura 5	Linha de transmissão com condutor cilíndrico sólido (em destaque).	35
Figura 6	Condutores i e j sobre um solo com suas imagens i' e j'	36
Figura 7	Campo magnético em uma LT sobre um solo real.	36
Figura 8	Admitâncias externas em um sistema de n condutores.	42
Figura 9	Campo elétrico em uma LT sobre um solo dielétrico (condutor com perdas).	43
Figura 10	LT monofásica usada nas simulações.	45
Figura 11	Impedância interna.	45
Figura 12	Impedância externa.	46
Figura 13	Impedância do solo.	46
Figura 14	Impedância longitudinal.	47
Figura 15	Admitância externa.	48
Figura 16	Admitância do solo.	49
Figura 17	Admitância transversal.	49
Figura 18	Solo estratificado.	51
Figura 19	Amostra de solo representada por matéria orgânica e água.	61
Figura 20	Amostra de solo representada por matéria orgânica, vazios de ar e água.	63
Figura 21	Dois condutores aéreos acima de N camadas de solo.	65
Figura 22	LT monofásica usada nas simulações.	68
Figura 23	$\sigma_{\text{solo}}(f)$ em função da frequência.	69
Figura 24	$\epsilon_r(f)$ em função da frequência.	69
Figura 25	Impedância do solo com $\sigma_{\text{solo}}(f)$ e $\epsilon_r(f)$	70
Figura 26	Admitância do solo com $\sigma_{\text{solo}}(f)$ e $\epsilon_r(f)$	71
Figura 27	σ_{solo} (esquerda) e ϵ_r (direita) em função da frequência e teor de umidade para: (a) e (b) Scott (S); (c) e (d) Longmire e Smith (LS); (e) e (f) Messier (M).	72

Figura 28	Impedância do solo (esquerda) e admitância do solo (direita) com $\sigma_{\text{solo}}(f, W)$ e $\epsilon_r(f, W)$ para: (a) e (b) Scott (S); (c) e (d) Longmire e Smith (LS); (e) e (f) Messier (M).	74
Figura 29	σ_{solo} em função do teor de umidade e porosidade.	75
Figura 30	Impedância do solo (esquerda) e admitância do solo (direita) com $\sigma_{\text{solo}}(W, \phi)$ e $\epsilon_r = 10$ para as frequências de: (a) e (b) 60 Hz; (c) e (d) 10 MHz.	76
Figura 31	γ_{eq} obtida por (93), considerando os três casos.	78
Figura 32	Impedância do solo com σ_{eq} e γ_{eq} , considerando os três casos.	78
Figura 33	Admitância do solo com σ_{eq} e γ_{eq} , considerando os três casos.	79
Figura 34	Circuito equivalente de uma linha de transmissão no domínio da frequência.	86
Figura 35	Código implementado em MATLAB para salvar o arquivo em formato .dat.	100
Figura 36	Estrutura do arquivo de dados .dat.	101
Figura 37	Estrutura do arquivo e dados .dat (continuação).	102
Figura 38	Estrutura do arquivo de dados .dat (final).	103
Figura 39	Circuito montado no ATPDraw, considerando o caso que será utilizado no Capítulo 5.	103
Figura 40	Configuração de LT paralela.	104
Figura 41	Energização da LT paralela.	105
Figura 42	Tensão no terminal receptor da linha de 230 kV (fase 1), considerando um solo de 10.000 Ω .m.	105
Figura 43	Tensão no terminal receptor da linha de 230 kV (fase 2), considerando um solo de 10.000 Ω .m.	105
Figura 44	Tensão no terminal receptor da linha de 230 kV (fase 3), considerando um solo de 10.000 Ω .m.	106
Figura 45	Tensão no terminal receptor da linha de 115 kV (fase 4), considerando um solo de 10.000 Ω .m.	106
Figura 46	Tensão no terminal receptor da linha de 115 kV (fase 5), considerando um solo de 10.000 Ω .m.	107
Figura 47	Tensão no terminal receptor da linha de 115 kV (fase 6), considerando um solo de 10.000 Ω .m.	107
Figura 48	Configuração de LT paralela.	110
Figura 49	Descarga atmosférica incidente na fase 1 da LT.	110

Figura 50	Descarga atmosférica do tipo <i>first return stroke</i> : (a) forma de onda no domínio do tempo e (b) forma de onda no domínio da frequência.	111
Figura 51	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 1 para σ_0 de: (a) 0,001 S/m e (b) 0,0001 S/m.	113
Figura 52	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 2 para σ_0 de: (a) 0,001 S/m e (b) 0,0001 S/m.	114
Figura 53	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 3 para σ_0 de: (a) 0,001 S/m e (b) 0,0001 S/m.	115
Figura 54	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 4 para σ_0 de: (a) 0,001 S/m e (b) 0,0001 S/m.	116
Figura 55	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 5 para σ_0 de: (a) 0,001 S/m e (b) 0,0001 S/m.	117
Figura 56	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 6 para σ_0 de: (a) 0,001 S/m e (b) 0,0001 S/m.	118
Figura 57	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 1 para W de: (a) 4,04% e (b) 2,57%.	120
Figura 58	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 2 para W de: (a) 4,04% e (b) 2,57%.	121
Figura 59	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 3 para W de: (a) 4,04% e (b) 2,57%.	122
Figura 60	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 4 para W de: (a) 4,04% e (b) 2,57%.	123
Figura 61	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 5 para W de: (a) 4,04% e (b) 2,57%.	124
Figura 62	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 6 para W de: (a) 4,04% e (b) 2,57%.	125
Figura 63	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 1 para W e ϕ de: (a) 15%, 30% e (b) 5%, 40%.	126
Figura 64	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 2 para W e ϕ de: (a) 15%, 30% e (b) 5%, 40%.	127
Figura 65	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 3 para W e ϕ de: (a) 15%, 30% e (b) 5%, 40%.	128
Figura 66	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 4 para W e ϕ de: (a) 15%, 30% e (b) 5%, 40%.	129

Figura 67	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 5 para W e ϕ de: (a) 15%, 30% e (b) 5%, 40%.	130
Figura 68	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 6 para W e ϕ de: (a) 15%, 30% e (b) 5%, 40%.	131
Figura 69	Valores da condutividade do solo, permissividade relativa e profundidade de cada camada para: (a) caso 1 e (b) caso 2.	132
Figura 70	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 1 para: (a) caso 1 e (b) caso 2.	133
Figura 71	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 2 para: (a) caso 1 e (b) caso 2.	134
Figura 72	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 3 para: (a) caso 1 e (b) caso 2.	135
Figura 73	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 4 para: (a) caso 1 e (b) caso 2.	136
Figura 74	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 5 para: (a) caso 1 e (b) caso 2.	137
Figura 75	Tensões transitórias no terminal receptor da fase 6 para: (a) caso 1 e (b) caso 2.	138
Figura 76	Configuração de LT paralela usada nas simulações dos Capítulos 4 e 5.	157
Figura 77	Y_c utilizando a equação (137) para os elementos: (a) 1,1; (b) 1,2; (c) 1,3.	160
Figura 78	Y_c utilizando a equação (137) para os elementos: (a) 1,4; (b) 1,5; (c) 1,6.	161
Figura 79	Y_c utilizando a equação (137) para os elementos: (a) 2,1; (b) 2,2; (c) 2,3.	162
Figura 80	Y_c utilizando a equação (137) para os elementos: (a) 2,4; (b) 2,5; (c) 2,6.	163
Figura 81	Y_c utilizando a equação (137) para os elementos: (a) 3,1; (b) 3,2; (c) 3,3.	164
Figura 82	Y_c utilizando a equação (137) para os elementos: (a) 3,4; (b) 3,5; (c) 3,6.	165
Figura 83	Y_c utilizando a equação (137) para os elementos: (a) 4,1; (b) 4,2; (c) 4,3.	166
Figura 84	Y_c utilizando a equação (137) para os elementos: (a) 4,4; (b) 4,5; (c) 4,6.	167
Figura 85	Y_c utilizando a equação (137) para os elementos: (a) 5,1; (b) 5,2; (c) 5,3.	168
Figura 86	Y_c utilizando a equação (137) para os elementos: (a) 5,4; (b) 5,5; (c) 5,6.	169
Figura 87	Y_c utilizando a equação (137) para os elementos: (a) 6,1; (b) 6,2; (c) 6,3.	170
Figura 88	Y_c utilizando a equação (137) para os elementos: (a) 6,4; (b) 6,5; (c) 6,6.	171
Figura 89	Função P_m utilizando a equação (139) para os modos: (a) 1; (b) 2; (c) 3.	172
Figura 90	Função P_m utilizando a equação (139) para os modos: (a) 4; (b) 5; (c) 6.	173
Figura 91	Forma de onda da descarga atmosférica do tipo <i>first return stroke</i> no domínio da frequência.	175

Figura 92	Valores da condutividade do solo de cada camada para: (a) caso 1 e (b) caso 2.	176
Figura 93	Profundidade de penetração calculada para cada condutividade do caso 1.	176
Figura 94	Profundidade de penetração calculada para cada condutividade do caso 2.	176

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Trabalhos que consideram o solo dependente da frequência, teor de umidade, porosidade e estratificação.	25
Tabela 2	Coefficientes α_i para (54) e (55).	56
Tabela 3	Parâmetros do modelo causal de Alípio e Visacro.	59
Tabela 4	Recomendações sobre se a dependência da frequência nos parâmetros do solo.	71
Tabela 5	Condutividades e distâncias de cada camada, considerando os três casos.	77
Tabela 6	Condutividades equivalentes obtidas por (83), considerando os três casos.	77
Tabela 7	$\Delta(\%)$ das tensões transitórias em relação a abordagem de ULM-ATP.	107
Tabela 8	Parâmetros da descarga atmosférica.	111
Tabela 9	Diferença Percentual de Pico ($\Delta_P(\%)$) - Parâmetros do solo dependentes da frequência.	117
Tabela 10	Diferença Percentual de Pico ($\Delta_P(\%)$) - Parâmetros do solo dependentes da frequência e do teor de umidade.	121
Tabela 11	Diferença Percentual de Pico ($\Delta_P(\%)$) - Condutividade do solo dependente do teor de umidade e da porosidade.	129
Tabela 12	Diferença Percentual de Pico ($\Delta_P(\%)$) - Solo estratificado de 4 camadas.	135
Tabela 13	Modelos e expressões para calcular a impedância do solo.	152
Tabela 14	Modelos e expressões para calcular a admitância do solo.	153
Tabela 15	Modelos e expressões para calcular os parâmetros do solo dependentes da frequência.	153
Tabela 16	Modelos e expressões para calcular os parâmetros do solo dependentes da frequência e do teor de umidade.	154
Tabela 17	Modelo e expressão para calcular a condutividade do solo dependente do teor de umidade e da porosidade.	154
Tabela 18	Modelos e expressões para calcular os parâmetros do do solo considerando o solo estratificado.	154
Tabela 19	Parâmetros da descarga atmosférica de Heidler.	175
Tabela 20	Profundidade de penetração (δ) de cada camada para o caso 1.	177
Tabela 21	Profundidade de penetração (δ) de cada camada para o caso 2.	177

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

LT	Linha de Transmissão
EMTP	<i>ElectroMagnetic Transient Program</i>
ATP-EMTP	<i>Alternative Transients Program</i>
GPR	<i>Ground Potential Rise</i>
CDEGS	<i>Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding, and Soil Structure Analysis</i>
FEKO	<i>Feldberechnung bei Krpern mit beliebiger Oberflche</i>
HEM-TD	<i>Hybrid Electromagnetic Model in the Time Domain</i>
ULM	<i>Universal Line Model</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
DQMN	Desvio Quadrático Médio Normalizado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Contextualização do tema	19
1.2	Objetivos	26
1.3	Contribuições	26
1.4	Estrutura do documento	27
1.5	Produção bibliográfica	28
2	LINHAS DE TRANSMISSÃO E SEUS PARÂMETROS	33
2.1	Introdução	33
2.2	Impedância longitudinal	33
2.2.1	Impedância interna	34
2.2.2	Impedância externa	35
2.2.3	Impedância devido ao efeito do solo	35
2.2.3.1	<i>Modelo de Carson</i>	37
2.2.3.2	<i>Modelo de Carson (aproximado)</i>	37
2.2.3.3	<i>Modelo de Wise/Nakagawa</i>	38
2.2.3.4	<i>Modelo de Sunde</i>	39
2.2.3.5	<i>Modelo de Sunde (forma fechada)</i>	39
2.2.3.6	<i>Modelo de Deri (forma fechada)</i>	40
2.2.3.7	<i>Modelo de Alvarado e Betancourt (forma fechada)</i>	40
2.2.3.8	<i>Modelo de Pettersson (forma fechada)</i>	41
2.2.3.9	<i>Modelo de Lima e Portela (forma fechada)</i>	41
2.2.3.10	<i>Modelo de Ametani (forma fechada)</i>	41
2.3	Admitância transversal	42
2.3.1	Admitância externa	42
2.3.2	Admitância devido ao efeito do solo	43
2.3.2.1	<i>Modelo de Wise/Nakagawa</i>	43
2.3.2.2	<i>Modelo de Tesche</i>	44
2.3.2.3	<i>Modelo de Pettersson (forma fechada)</i>	44

2.4	Resultados numéricos dos parâmetros da LT	44
2.5	Síntese do capítulo	50
3	PARÂMETROS DO SOLO DEPENDENTES DE FATORES AMBIENTAIS E DA FREQUÊNCIA	51
3.1	Introdução	51
3.2	Parâmetros do solo dependentes da frequência	52
3.2.1	Smith-Rose (SR)	53
3.2.2	Scott (S)	54
3.2.3	Longmire e Smith (LS)	54
3.2.4	Messier (M)	56
3.2.5	Visacro e Portela (VP)	56
3.2.6	Portela (P)	57
3.2.7	Visacro e Alípio (VA)	58
3.2.8	Alípio e Visacro (AV)	58
3.2.9	Datsios e Mikropoulos (DM)	59
3.3	Parâmetros do solo dependentes da frequência e do teor de umidade	60
3.3.1	Scott (S)	61
3.3.2	Longmire e Smith (LS)	61
3.3.3	Messier (M)	62
3.4	Parâmetros do solo dependentes do teor de umidade e da porosidade	63
3.4.1	Archie/Fu	63
3.5	Parâmetros do solo considerando um solo estratificado	64
3.5.1	Martins-Britto	65
3.5.2	Xue	66
3.6	Resultados numéricos	67
3.6.1	Resultados numéricos dos modelos do solo dependentes da frequência	68
3.6.2	Resultados numéricos dos modelos do solo dependentes da frequência e do teor de umidade	72
3.6.3	Resultados numéricos dos modelos do solo dependentes do teor de umidade e da porosidade	74
3.6.4	Resultados numéricos dos modelos que consideram um solo estratificado	76
3.7	Síntese do capítulo	80

4	UNIVERSAL LINE MODEL - ULM	82
4.1	Introdução	82
4.2	Desenvolvimento do ULM	84
4.2.1	Equações de tensão e corrente em LTs	84
4.2.2	Funções racionais	87
<i>4.2.2.1</i>	<i>Aproximação racional da admitância característica Y_c</i>	<i>87</i>
<i>4.2.2.2</i>	<i>Aproximação racional da função de propagação H</i>	<i>88</i>
4.2.3	<i>Vector Fitting</i>	89
4.3	Implementação do ULM no software ATP-EMTP	90
4.3.1	Desenvolvimento de código no MATLAB	91
<i>4.3.1.1</i>	<i>Cálculo dos parâmetros da linha</i>	<i>91</i>
<i>4.3.1.2</i>	<i>Determinação da admitância característica (Y_c)</i>	<i>91</i>
<i>4.3.1.3</i>	<i>Aproximação de Y_c pela técnica de ajuste vetorial (Vector Fitting)</i>	<i>92</i>
<i>4.3.1.4</i>	<i>Determinação da função de propagação (H)</i>	<i>92</i>
<i>4.3.1.5</i>	<i>Aproximação de H pela técnica de ajuste vetorial (Vector Fitting)</i>	<i>93</i>
<i>4.3.1.6</i>	<i>Estrutura do arquivo de dados .dat</i>	<i>93</i>
4.3.2	Utilização do software ATP-EMTP	99
4.4	Validação da implementação	103
4.5	Síntese do capítulo	108
5	RESULTADOS NUMÉRICOS	109
5.1	Introdução	109
5.2	Tensões transitórias	109
5.2.1	Tensões transitórias considerando os parâmetros do solo dependentes da frequência	112
5.2.2	Tensões transitórias considerando os parâmetros do solo dependentes da frequência e do teor de umidade	118
5.2.3	Tensões transitórias considerando a condutividade do solo dependente do teor de umidade e da porosidade	122
5.2.4	Tensões transitórias considerando o solo como estratificado	130
5.3	Síntese do capítulo	139
6	CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS	140
6.1	Conclusões	140

6.2	Propostas futuras	142
	REFERÊNCIAS	143
	APÊNDICE A - TABELAS	152
	APÊNDICE B - REDUÇÃO DOS CABOS PARA-RAIOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	155
	APÊNDICE C - AJUSTE VETORIAL DA ADMITÂNCIA CARACTERÍSTICA E FUNÇÃO DE PROPAGAÇÃO	159
	APÊNDICE D - PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO	174

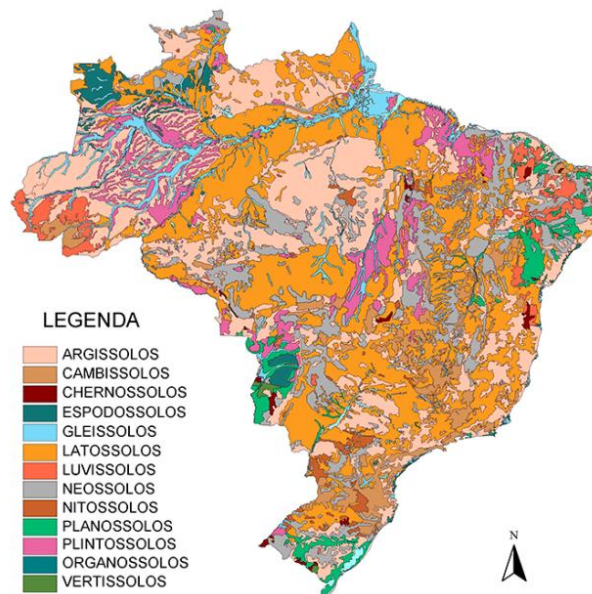
1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema

Para uma avaliação precisa dos transitórios eletromagnéticos que ocorrem nos sistemas de energia elétrica, é fundamental realizar uma modelagem adequada de seus componentes elétricos, como as linhas de transmissão (torres, sistemas de aterramento, condutores elétricos, isoladores). Nesse contexto, as linhas de transmissão (LTs) devem levar em consideração o efeito do solo sobre o qual estão localizadas, a fim de calcular com precisão os transitórios eletromagnéticos gerados por diversos tipos de distúrbios.

O solo é composto por matéria orgânica organizada em diversas camadas, contendo água, sais minerais dissolvidos e ar (na forma de poros). Adicionalmente, fatores como o clima e a topografia influenciam de maneira significativa o solo de uma dada região. Para estudos relacionados à engenharia elétrica, o solo pode ser representado por seus parâmetros eletromagnéticos, que são: resistividade elétrica (ou condutividade elétrica), permissividade relativa e permeabilidade magnética. Com base nas características físicas de uma região, diferentes tipos de solo podem ser classificados. No Brasil, a distribuição dos tipos de solo é bastante diversificada, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Tipos de solo no Brasil.

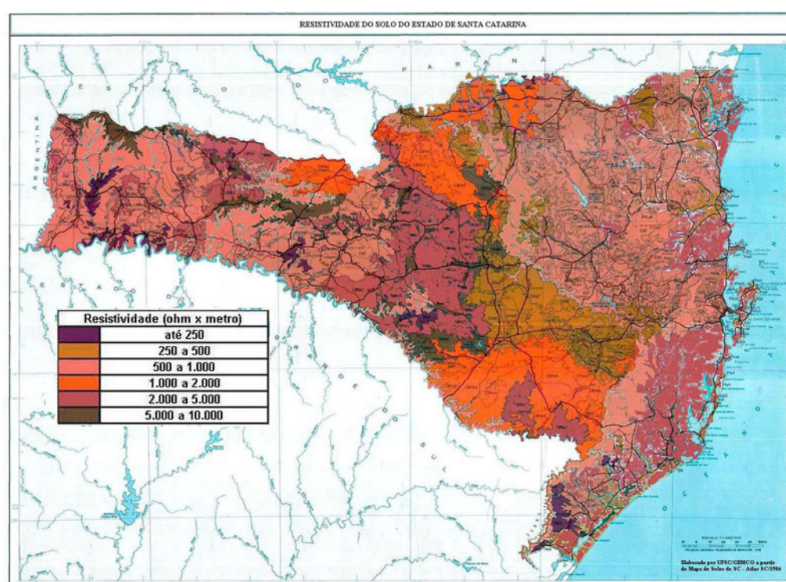


Fonte: GEO (2014).

Os diversos tipos de solo estão associados a variados valores de resistividade. Em 2008, Molina *et al.* (2008) realizaram um estudo em que foram feitas medições nos diferentes tipos de solos encontrados no estado de Santa Catarina, com o objetivo de determinar suas resistividades. A Figura 2 mostra o mapa de Santa Catarina com os valores das resistividades do solo. Como

pode ser visto, as resistividades do solo variam entre valores inferiores a 250 até 10.000 $\Omega.m$, indicando que, em uma mesma região, há uma variação significativa da resistividade do solo. Adicionalmente, diferentes valores de resistividade são observados para o mesmo tipo de solo em localidades distintas (Visacro, 2002).

Figura 2 - Mapa das resistividades do solo no estado de Santa Catarina.



Fonte: Molina *et al.* (2008).

No que diz respeito às propriedades do solo, sabe-se que, devido ao fato do solo ser considerado um meio dielétrico não ideal (com perdas), os campos eletromagnéticos que se propagam nele apresentam uma corrente caracterizada por um comportamento divergente, sendo composta por correntes de condução e de deslocamento, cujas densidades dependem do campo elétrico incidente no domínio da frequência (Alípio; Visacro, 2014). Além do mais, os parâmetros elétricos do solo (condutividade/resistividade e permissividade relativa) são expressivamente influenciados pelos fatores físicos, como porosidade, umidade, estratificação e frequência.

Nos últimos anos, vários autores estudaram o efeito desses fatores físicos nos parâmetros do solo para o cálculo de transitórios eletromagnéticos (Papadopoulos *et al.*, 2020a; Salarieh; De Silva; Kordi, 2020; Liu *et al.*, 2022; Colqui *et al.*, 2022). No entanto, a maioria dos simuladores do tipo *ElectroMagnetic Transient Program* (EMTP) ainda calcula a impedância devido ao efeito do solo usando a formulação de Carson, com parâmetros do solo constantes, e negligencia a admitância devido ao efeito do solo. Essas suposições podem gerar erros na representação dos solos.

Esta introdução fornece uma breve revisão de alguns trabalhos que consideram os solos dependentes dos fatores físicos: frequência, teor de umidade, porosidade e estratificação.

O trabalho de Moura *et al.* (2014) analisa a influência da dependência da frequência nos parâmetros do solo em LTs trifásicas. Esse artigo aborda a propagação de ondas e transitórios

eletromagnéticos ao considerar o solo como um meio dispersivo, implicando na variação da condutividade do solo e permissividade relativa. São apresentadas simulações da impedância longitudinal e admitância transversal para uma LT trifásica com cabos para-raios. Os resultados mostram que o parâmetro mais afetado pelo solo é a resistência longitudinal, especialmente em solos de maior resistividade e no espectro de frequência superior. Além disso, observa-se que a desconsideração do solo é uma aproximação válida para os parâmetros transversais.

Conti e Emídio (2016) investigam o efeito dos parâmetros do solo dependentes da frequência na simulação de transitórios eletromagnéticos em linhas aéreas de distribuição. Os parâmetros da linha são calculados com base em um modelo de solo fundamentado em medições de campo da condutividade do solo e da permissividade relativa em uma ampla faixa de frequência. Simulações no domínio do tempo são realizadas, considerando diferentes tipos de transitórios em linhas aéreas de distribuição típicas. Os resultados indicam que a consideração dos parâmetros do solo dependentes da frequência é relevante na simulação de transitórios de alta frequência em linhas quando o solo é um mau condutor.

Schroeder *et al.* (2018) avaliam o impacto de considerar uma representação para o sistema de aterramento juntamente com a dependência da frequência nos parâmetros do solo em sobretensões desenvolvidas em isoladores devido a descargas atmosféricas. Para incluir uma modelagem precisa do sistema de aterramento no software *Alternative Transients Program (ATP-EMTP)*, um modelo eletromagnético é utilizado em conjunto com o método numérico *Vector Fitting*. Os resultados demonstram que a dependência da frequência nos parâmetros do solo resulta em uma redução da impedância de aterramento. Além disso, a consideração da variação dos parâmetros do solo em função da frequência é mais significativa no *Ground Potential Rise (GPR)* do que nas sobretensões nas cadeias de isoladores.

Salarieh, De Silva e Kordi (2020) investigam o efeito da dependência da frequência e do teor de umidade nos parâmetros do solo em eletrodos de aterramento verticais e horizontais submetidos a descargas atmosféricas. Para levar em consideração a dependência da frequência e do teor de umidade, os autores comparam quatro formulações distintas propostas na literatura (Scott, Longmire e Smith, Messier e Datsios e Mikropoulos). Para obter as respostas transitórias no domínio do tempo, utilizam um circuito equivalente dos eletrodos de aterramento, ajustado por funções racionais que expressam os polos e resíduos com elementos RLC (resistor, indutor e capacitor). Os resultados mostram a importância de considerar a variação da frequência e do teor de umidade na resposta transitória em eletrodos de aterramento, de acordo com o tipo de solo. Ademais, a dependência da frequência nos parâmetros do solo resulta em uma diminuição da impedância de aterramento em comparação ao caso em que os parâmetros são assumidos constantes.

Batista *et al.* (2020) apresentam um estudo sobre o arranjo de aterramento para torres de transmissão, considerando o solo como estratificado. A impedância harmônica de aterramento

é obtida com base na teoria de LTs para um solo com duas camadas, sendo que a primeira camada possui resistividade maior em comparação à segunda. Os arranjos de aterramento com eletrodos horizontais e verticais são avaliados, e os resultados obtidos são comparados com aqueles resultantes de um método rigoroso de eletromagnetismo. A partir dos resultados, os autores demonstram que o uso de eletrodos verticais é uma alternativa altamente eficaz para o aterramento de torres de transmissão, especialmente em cenários nos quais a resistividade da camada superior do solo é maior do que a da camada inferior. Essa solução se mostra vantajosa em casos críticos, nos quais é muito complexo obter baixas resistências ou impedâncias de impulso utilizando fios de contrapeso.

No artigo de Araújo, Azevedo e Pissolato Filho (2021), os autores estudam as implicações de se considerar os parâmetros do solo dependentes da frequência e do teor de umidade na impedância harmônica de aterramento e no GPR. A condutividade do solo e a permissividade relativa são obtidas por meio da formulação de Messier. Para calcular o GPR, uma descarga atmosférica modelada pela função dupla exponencial de 1,20/50 μs (sendo 1,20 de frente e 50 de calda) é injetada no eletrodo. Os resultados indicam que a impedância harmônica de aterramento tem uma variação mais significativa quando o teor de umidade é mais elevado, e os picos do GPR são consideravelmente reduzidos em solos úmidos.

Uma metodologia para o cálculo dos parâmetros de LTs, considerando interferências de dutos metálicos (*pipelines*) e os efeitos da estratificação do solo, é desenvolvida no trabalho de Moraes *et al.* (2021), com base na solução analítica da forma fechada da integral de Carson. Neste trabalho, essa metodologia é aplicada por meio de simulações em seis cenários de curto-circuito em uma LT de 230 kV, 60 Hz e 200 km de comprimento, utilizando o software ATP-EMTP. O objetivo é avaliar o impacto dessas interferências nos algoritmos de localização de faltas, especialmente em métodos que dependem dos parâmetros de sequência zero, como os de um terminal. Os resultados indicam que a negligência dos efeitos de interferências de dutos metálicos e da estratificação do solo pode afetar significativamente a precisão desses algoritmos.

Kou *et al.* (2021) estudam a influência de diferentes configurações de solo — uniformes, estratificados horizontalmente e estratificados verticalmente — na tensão induzida em dutos enterrados (*pipelines*) de petróleo e gás, quando estes são paralelos a LTs sujeitas a descargas atmosféricas. Os autores utilizam o software *Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis* (CDEGS) para investigar essa influência sobre a tensão no revestimento dos dutos. Os resultados mostram que, de modo geral, a tensão no revestimento do duto aumenta com a resistividade do solo. Assim, a máxima tensão no revestimento ao longo do duto está diretamente relacionada à resistividade do solo ao redor do dispositivo de aterramento da torre de transmissão atingida pela descarga atmosférica. Dessa forma, os autores concluem que, no projeto de dutos e LTs, é recomendado que as linhas sejam instaladas em regiões com baixa resistividade do solo, sempre que possível.

O trabalho de Diniz, Alípio e Moura (2022) investiga a influência da admitância devido ao efeito do solo usando a formulação de Pettersson, considerando os parâmetros do solo dependentes da frequência a partir da formulação de Alípio e Visacro na simulação de transitórios em LTs. As respostas temporais são obtidas por meio da transformada numérica de Laplace. Os resultados mostram que a dependência da frequência nos parâmetros do solo pode ser relevante na simulação de transitórios decorrentes da incidência de descargas atmosféricas, especialmente se a LT estiver situada acima de um solo que possui alto valor de resistividade. Ademais, mostra-se que o uso da aproximação de Carson resulta em desvios significativos nas respostas transitórias, ocasionando sobretensões.

Liu *et al.* (2022) analisam os efeitos do teor de umidade e da porosidade nas tensões induzidas e na propagação de campos eletromagnéticos gerados por descargas atmosféricas em LTs. Os autores utilizam o modelo melhorado de Archie junto com um modelo bidimensional de diferenças finitas no domínio do tempo para obter as respostas. A partir dos resultados, nota-se que a consideração do teor de umidade e da porosidade tem um impacto significativo nos valores de pico nos campos eletromagnéticos. Adicionalmente, nas tensões induzidas, a diferença se torna mais pronunciada à medida que se considera um baixo valor de porosidade, alterando os valores do teor de umidade.

O impacto da porosidade e do teor de umidade na impedância harmônica de aterramento e no GPR é investigado em Azevedo, Araújo e Pissolato Filho (2022). A variação da porosidade e do teor de umidade é inserida no cálculo da condutividade do solo por meio do modelo melhorado de Archie. São considerados dois tipos de solo: argiloso e arenoso, e um solo seco é utilizado como parâmetro de comparação. O GPR é calculado para descargas atmosféricas modeladas pela função de Heidler (*first e subsequent stroke*). Os resultados apresentam uma influência significativa nos valores de pico do GPR em solos saturados quando se considera a porosidade e o teor de umidade, em comparação com o solo seco. Além disso, o solo se torna mais condutivo à medida que se aumenta o teor de umidade e se diminui a porosidade, gerando variações mais pronunciadas nas respostas transitórias.

O trabalho de Colqui *et al.* (2022) analisa o impacto nos parâmetros da LT ao considerar um solo homogêneo em comparação com solos estratificados, de duas, três e quatro camadas. Além disso, compara as diferenças ao considerar a formulação de referência (derivada das equações de campo eletromagnético) e a formulação aproximada (derivadas do conceito de constante de propagação equivalente) para o cálculo da impedância e da admitância devido ao efeito do solo. Os resultados mostram que o uso de solos homogêneos pode gerar variações significativas nos parâmetros da linha em comparação com solos estratificados. As maiores diferenças observadas são de 67% para os valores de resistência, 28% para os de indutância e 9,6% para os de capacitância, sendo todos esses máximos registrados para o modelo de solo com quatro camadas. Além disso, a comparação entre as fórmulas aproximada e exata revela diferenças de até

2,3%, indicando que o uso de fórmulas aproximadas pode ser uma solução prática para reduzir a complexidade computacional, sem comprometer significativamente a precisão dos resultados.

O impacto dos modelos do solo dependentes da frequência e do teor de umidade, propostos por Scott, Smith-Longmire e Messier, no GPR induzido por descargas atmosféricas (do tipo *first e subsequent stroke*) em hastes de aterramento e nas tensões ao longo da cadeia de isoladores de uma torre de transmissão é investigado no trabalho de Azevedo *et al.* (2023). Nesse trabalho, usando o software eletromagnético de onda completa *Feldberechnung für Körper mit beliebiger Oberfläche* (FEKO), calcula-se a impedância harmônica de aterramento para hastes de 3, 15 e 30 metros, enterradas em solos dependentes da frequência e do teor de umidade. As respostas são comparadas com as obtidas assumindo um solo com propriedades constantes. Os resultados demonstram que a impedância harmônica de aterramento é significativamente afetada pelo modelo de solo. No que diz respeito às formas de onda do GPR, observa-se uma redução significativa nos picos de tensão ao utilizar o modelo de solo dependente da frequência e do teor de umidade, em comparação com os modelos que assumem um solo constante. Além disso, é realizada uma análise de *backflashover*, mostrando que interrupções em sistemas de energia podem ocorrer em função da modelagem do solo, destacando a importância de considerar tanto a frequência quanto o teor de umidade nos estudos de fenômenos transitórios.

Silva, Visacro e Silveira (2023) apresentam duas novas abordagens para levar em consideração a dependência da frequência nos parâmetros do solo no *Hybrid Electromagnetic Model in the Time Domain* (HEM-TD). Essas abordagens consistem em uma evolução da metodologia anterior do HEM-TD, modelando a dependência da resistividade do solo e permissividade relativa por meio de uma soma de funções racionais. Realizam-se simulações do GPR e da impedância de impulso em um arranjo típico de eletrodos de aterramento de torres de transmissão, enterrados em solos com diferentes resistividades (baixa, média e alta), e submetidos a formas de onda de descargas atmosféricas do tipo *first e subsequent stroke*. Os resultados obtidos com as novas abordagens são comparados com os resultados precisos do modelo HEM, apresentando excelente concordância, o que comprova a eficácia das propostas. Adicionalmente, os autores destacam que essas abordagens proporcionam uma melhoria significativa em relação aos resultados da abordagem inicial do HEM-TD.

O trabalho de Araújo *et al.* (2023) analisa a influência da porosidade e do teor de umidade no comportamento transitório de sobretensões em torres de transmissão, utilizando a formulação aprimorada de Archie. A impedância harmônica de aterramento da base da torre, enterrada em solo saturado, é calculada por meio do software eletromagnético de onda completa FEKO. Estuda-se o impacto desses dois fatores na impedância harmônica e no GPR geradas por descargas atmosféricas do tipo *first e subsequent stroke*. Adicionalmente, computam-se as sobretensões ao longo da cadeia de isoladores de uma torre de transmissão atingida no topo por essas descargas atmosféricas. Os resultados demonstram que, à medida que o nível de porosidade

umenta, há uma influência significativa sobre a impedância harmônica de aterramento. Isso provoca um aumento nos valores de pico das formas de onda do GPR, além de uma variação acentuada nas sobretensões transitórias ao longo da cadeia de isoladores da torre. Essas variações podem induzir a ocorrência de *backflashover*, levando a possíveis interrupções no sistema de energia. Por fim, os autores concluem que a consideração do nível de porosidade do solo é crucial para a correta avaliação das respostas transitórias eletromagnéticas, garantindo um melhor desempenho e confiabilidade no comportamento de sistemas de aterramento em torres de transmissão submetidas a descargas atmosféricas.

A Tabela 1 apresenta os trabalhos anteriormente mencionados que consideram o solo dependente da frequência, teor de umidade, porosidade e estratificação, organizados em ordem cronológica. Na tabela, são fornecidos o nome dos autores, o fator físico considerado nos parâmetros do solo e a aplicação em que estão sendo utilizados.

Tabela 1 - Trabalhos que consideram o solo dependente da frequência, teor de umidade, porosidade e estratificação.

Autor (Ano)	Parâmetros do solo	Aplicação
Moura <i>et al.</i> (2014)	Frequência	Linha de transmissão
Conti e Emídio (2016)	Frequência	Linha de distribuição
Schroeder <i>et al.</i> (2018)	Frequência	Aterramento
Salarieh, De Silva e Kordi (2020)	Frequência e teor de umidade	Aterramento
Batista <i>et al.</i> (2020)	Estratificação	Aterramento
Araújo, Azevedo e Filho (2021)	Frequência e teor de umidade	Aterramento
Moraes <i>et al.</i> (2021)	Estratificação	Linha de transmissão
Kou <i>et al.</i> (2021)	Estratificação	Linha de transmissão
Diniz, Alípio e Moura (2022)	Frequência	Linha de transmissão
Liu <i>et al.</i> (2022)	Teor de umidade e porosidade	Linha de transmissão
Azevedo, Araújo e Filho (2022)	Teor de umidade e porosidade	Aterramento
Colqui <i>et al.</i> (2022)	Estratificação	Linha de transmissão
Azevedo <i>et al.</i> (2023)	Frequência e teor de umidade	Aterramento
Silva, Visacro e Silveira (2023)	Frequência	Aterramento
Araújo <i>et al.</i> (2023)	Teor de umidade e porosidade	Aterramento

Fonte: Autoria própria.

A partir desses trabalhos, verifica-se que a consideração dos parâmetros do solo dependentes da frequência, teor de umidade, porosidade e estratificação tem sido amplamente estudada na literatura científica. Esse contexto motivou a realização deste trabalho, que se dedica a obter uma metodologia aprimorada, considerando um solo mais realista para as simulações de transitórios eletromagnéticos. Buscando assim, avaliar a influência das características físicas do solo nas respostas transitórias de sistemas de energia elétrica quando ocorre a incidência de descargas atmosféricas, usando como modelo de linha o *Universal line model* (ULM).

1.2 **Objetivos**

O objetivo desta tese é investigar como os fatores físicos do solo, incluindo frequência, teor de umidade, porosidade e estratificação, afetam as respostas transitórias nos sistemas de potência quando submetidos a descargas atmosféricas. O estudo busca propor uma metodologia aprimorada, onde um modelo de LT mais realista e com menos limitações é desenvolvido utilizando o ULM implementado nos softwares MATLAB e ATP-EMTP. A pesquisa almeja aprimorar a precisão das simulações de transitórios eletromagnéticos, considerando as variações do solo e um modelo de linha consolidado, resultando em respostas mais confiáveis e uma compreensão mais adequada dos fenômenos transitórios. Isso visa melhorar a previsibilidade das tensões transitórias, aumentando a confiabilidade, a eficiência operacional e a qualidade da energia nos sistemas de potência.

1.3 **Contribuições**

As principais contribuições desta tese são:

1. Revisão das principais formulações propostas na literatura científica ao longo dos anos para o cálculo da impedância e da admitância devido ao efeito do solo;
2. Comparação entre as principais formulações mencionadas no item 1, com o objetivo de identificar o modelo mais coerente e com menos limitações para aplicação prática;
3. Apresentação dos principais modelos propostos na literatura para levar em consideração os fatores físicos do solo (frequência, teor de umidade, porosidade e estratificação);
4. Realização de simulações para os modelos do item 3, visando determinar a modelagem mais coerente a ser empregada em cada caso;
5. Desenvolvimento detalhado do procedimento realizado para incorporar o modelo ULM no software ATP-EMTP;
6. Obtenção de uma metodologia aprimorada que considera o modelo de linha ULM levando em conta o solo com características físicas mais realistas para simulações de transitórios eletromagnéticos;
7. Avaliação da influência das características do solo nas respostas transitórias;
8. Colaboração com o Professor Amauri Gutierrez Martins-Britto na implementação do modelo ULM para disponibilização por meio do toolbox, conforme disponível no link <https://lnkd.in/dnvcXgw3>.

1.4 Estrutura do documento

Este documento está estruturado em seis capítulos, incluindo esta introdução e quatro apêndices, listados a seguir:

- *Capítulo 2: Linhas de Transmissão e seus parâmetros* - Aborda os parâmetros da LT, incluindo impedância longitudinal, interna, externa e devido ao efeito do solo e admitância transversal, externa e devido ao efeito do solo, apresentando os modelos e métodos existentes na literatura para seu cálculo. Além disso, são mostrados resultados numéricos para cada um desses parâmetros para uma LT monofásica. O objetivo deste capítulo é entender e identificar qual modelagem apresenta menos limitações e seria recomendada para o cálculo dos parâmetros associados ao solo;
- *Capítulo 3: Parâmetros do solo dependentes de fatores ambientais e da frequência* - São discutidas as variações da condutividade do solo e permissividade relativa em função da frequência, teor de umidade e porosidade. Adicionalmente, são analisadas a constante de atenuação e a condutividade do solo em um cenário de solo estratificado. Diversos modelos propostos na literatura para esses parâmetros ao longo dos anos são listados, juntamente com suas expressões. Resultados numéricos da condutividade do solo, permissividade relativa, constante de atenuação, impedância devido ao efeito do solo e admitância devido ao efeito do solo, considerando a dependência de fatores ambientais e da frequência, são apresentados. O objetivo deste capítulo é compreender e identificar o modelo mais adequado para o cálculo de cada parâmetro;
- *Capítulo 4: Universal Line Model (ULM)* - Trata do desenvolvimento do ULM. É descrito o procedimento para incorporá-lo ao software ATP-EMTP, considerando a influência dos fatores ambientais do solo e da frequência. A validação dessa implementação é realizada pela comparação dos resultados obtidos com o ULM-implementado (pela autora) e o ULM-ATP, que é o modelo atualmente disponível no software ATP-EMTP;
- *Capítulo 5: Resultados Numéricos* - Apresenta os resultados numéricos, incluindo simulações para uma configuração em que duas LTs trifásicas, dispostas paralelamente, são submetidas à incidência de descarga atmosférica. Os resultados são comparados utilizando a abordagem ULM-implementado com: (i) parâmetros do solo dependentes da frequência, calculados pela formulação de Alípio e Visacro; (ii) parâmetros do solo dependentes da frequência e do teor de umidade, calculados pela equação de Messier; (iii) condutividade do solo dependente do teor de umidade e da porosidade, obtida pelo modelo de Archie/Fu; (iv) constante de propagação equivalente, considerando o solo estratificado pelo método de Xue. Para referência e comparação, utiliza-se a abordagem ULM-ATP, que considera a condutividade do solo constante e despreza as correntes de

deslocamento e a admitância devido ao efeito do solo. Esta é a abordagem disponível na versão atualizada do software ATP-EMTP. A partir dos resultados, são extraídas conclusões sobre o impacto de considerar um modelo de solo mais realista nas respostas transitórias;

- *Capítulo 6: Conclusões e Propostas futuras* - Contém as conclusões finais, juntamente com as propostas de continuidade do trabalho, seguido das referências bibliográficas;
- *Apêndice A: Tabelas* - Apresenta tabelas contendo todas as formulações dos modelos que calculam a impedância devido ao efeito do solo, a admitância devido ao efeito do solo, os parâmetros do solo dependentes da frequência, os parâmetros do solo dependentes da frequência e do teor de umidade, a condutividade do solo dependente do teor de umidade e da porosidade, a condutividade do solo equivalente e a constante de propagação equivalente, considerando um solo estratificado. Essa organização visa facilitar a compreensão dos modelos;
- *Apêndice B: Redução dos cabos para-raios em linhas de transmissão* - Mostra como realizar a representação implícita dos cabos para-raios, utilizando a redução de Kron nas matrizes de impedância longitudinal e admitância transversal da linha;
- *Apêndice C: Ajuste vetorial da admitância característica e da função de propagação* - Exibe as curvas com os elementos das matrizes da admitância característica e da função de propagação e também as respectivas curvas ajustadas utilizando o método do *Vector Fitting*.
- *Apêndice D: Profundidade de penetração* - Descreve o cálculo da profundidade de penetração do solo. Além disso, são realizadas simulações que demonstram que a onda eletromagnética resultante da descarga atmosférica utilizada nos resultados atinge a última camada, considerando o solo como estratificado.

1.5 Produção bibliográfica

Durante o período de desenvolvimento desta tese, foram publicados e submetidos artigos em periódicos científicos (Jx) e em simpósios/congressos nacionais e internacionais (Cx) especializados na área de Engenharia Elétrica. Abaixo segue a lista desses artigos:

Artigos publicados e submetidos em periódicos científicos:

- **J1 - Pascoalato, T. F. G.;** Araújo, A. R. J.; Caballero, P. T.; Colqui, J. S. L.; Kurokawa S. "*Transient Analysis of Multiphase Transmission Lines Located above Frequency-Dependent Soils*", in *Energies*, vol. 14, p. 5252, 2021. PUBLICADO.

- **J2 - Pascoalato, T. F. G.;** Araújo, A. R. J.; Kurokawa S.; Pissolato Filho, J. "*Analysis of transient voltages and currents in short transmission lines on frequency-dependent soils*", in Electric Power Systems Research, vol. 194, p. 107103, 2021. PUBLICADO.
- **J3 - Pascoalato, T. F. G.;** Araújo, A. R. J.; Colqui, J. S. L.; Kurokawa S.; Pissolato Filho, J. "*A Comparison of Frequency-Dependent Soil Models: Electromagnetic Transient Analysis of Overhead Transmission Lines Using Modal Decomposition*", in Energies, vol. 15, p. 1687, 2022. PUBLICADO.
- **J4 - Colqui, J. S. L.;** Araújo, A. R. J.; **Pascoalato, T. F. G.;** Kurokawa S.; Pissolato Filho, J. "*Transient Analysis on Multiphase Transmission Line above Lossy Ground Combining Vector Fitting Technique in ATP Software*", in IEEE Access, vol. 10, p. 1-1, 2022. PUBLICADO.
- **J5 - Pascoalato, T. F. G.;** Araújo, A. R. J.; Kurokawa S.; Pissolato Filho, J. "*Analysis of soil physical factors on transient responses of overhead transmission lines subjected to lightning strikes*", in e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, v. 6, p. 100291, 2023. PUBLICADO.
- **J6 - Pascoalato, T. F. G.;** Araújo, A. R. J.; Kurokawa S.; Pissolato Filho, J. "*Effects of Frequency-Dependent Soil Electrical Parameters on Sequence Parameters of Double-Circuit Transmission Lines*", in Electric Power Systems Research, 2024. SUBMETIDO.

Artigos publicados e submetidos em simpósios/congressos nacionais e internacionais:

- **C1 - Pascoalato, T. F. G.;** Araújo, A. R. J.; Kurokawa S.; Pissolato Filho, J. "*Transient Responses on Transmission Lines Located Above Frequency-Dependent Soil with Variable Water Content*", in Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS), Brasília, Brasil, 2021. PUBLICADO.
- **C2 - Pascoalato, T. F. G.;** Araújo, A. R. J.; Colqui, J. S. L.; Kurokawa S.; Pissolato Filho, J. "*An Analysis of Frequency-Dependent Soil Models: Influence on the Transient Responses*", in 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), São Paulo, Brasil, 2021. PUBLICADO.
- **C3 - Colqui, J. S. L.;** Araújo, A. R. J.; **Pascoalato, T. F. G.;** Kurokawa S. "*Transient Analysis of Overhead Transmission Lines Based on Fitting Methods*", in 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), São Paulo, Brasil, 2021. PUBLICADO.

- **C4 - Pascoalato, T. F. G.;** Kurokawa S.; Araújo, A. R. J.; Pissolato Filho, J. "*Análise Transitória em Linhas de Transmissão Trifásicas com Condutores de Fase Inclínicos*", in XXIV Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Fortaleza, Brasil, 2022. PUBLICADO.
- **C5 - Pascoalato, T. F. G.;** Araújo, A. R. J.; Kurokawa S.; Pissolato Filho, J. "*Influência dos Cabos Para-raios nas Tensões Transitórias de Linhas de Transmissão*", in XXIV Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Fortaleza, Brasil, 2022. PUBLICADO.
- **C6 - Pascoalato, T. F. G.;** Araújo, A. R. J.; Kurokawa S.; Pissolato Filho, J. "*Transient Analysis of Distinct Approaches for Modeling Transmission Lines Including Ground-Return Parameters*", in XIV Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission (CLAGTEE), Rio de Janeiro, Brasil, 2022. PUBLICADO.
- **C7 - Pascoalato, T. F. G.;** Araújo, A. R. J.; Kurokawa S.; Pissolato Filho, J. "*Impact of Volumetric Water Content and Porosity on Transmission Lines Submitted to Energization and Lightning Strikes*", in Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS), Fortaleza, Brasil, 2022. PUBLICADO.
- **C8 - Pascoalato, T. F. G.;** Araújo, A. R. J.; Kurokawa S.; Pissolato Filho, J. "*Influence of Frequency-Dependent Soil Models with Variable Water Content on Transient Responses of Overhead Transmission Lines*", in IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, USA, 2022. PUBLICADO.
- **C9 - Pascoalato, T. F. G.;** Araújo, A. R. J.; Kurokawa S. "*Estudo Inicial a Respeito de Sobretensões em Linhas de Transmissão Considerando o Efeito da Frequência Sobre os Parâmetros do Solo*", in IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Santa Maria, Brasil, 2022. PUBLICADO.
- **C10 - Pascoalato, T. F. G.;** Araújo, A. R. J.; Kurokawa S.; Pissolato Filho, J. "*Including Frequency-Dependent Soil Electrical Parameters on Lumped Transmission Line Model*", in X Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Manaus, Brasil, 2023. PUBLICADO.
- **C11 - Pascoalato, T. F. G.;** Azevedo, W. L. M.; Araújo, A. R. J.; Martins-Britto, A. G.; Kurokawa S.; Pissolato Filho, J. "*Analysis of Overvoltages in Power Systems Due to Lightning Strikes: On the Effects of the Line Modeling Approach and Frequency-Dependent Soil Properties*", in 59th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Cardiff, País de Gales, 2024. PUBLICADO.
- **C12 - Pascoalato, T. F. G.;** Araújo, A. R. J.; Kurokawa S.; Pissolato Filho, J. "*Investigation of Sequence Parameters of Overhead Transmission Lines Located on Soils*

with Frequency-Dependent Electrical Parameters", in XV Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission (CLAGTEE), Mar Del Prata, Argentina, 2024. ACEITO E APRESENTADO.

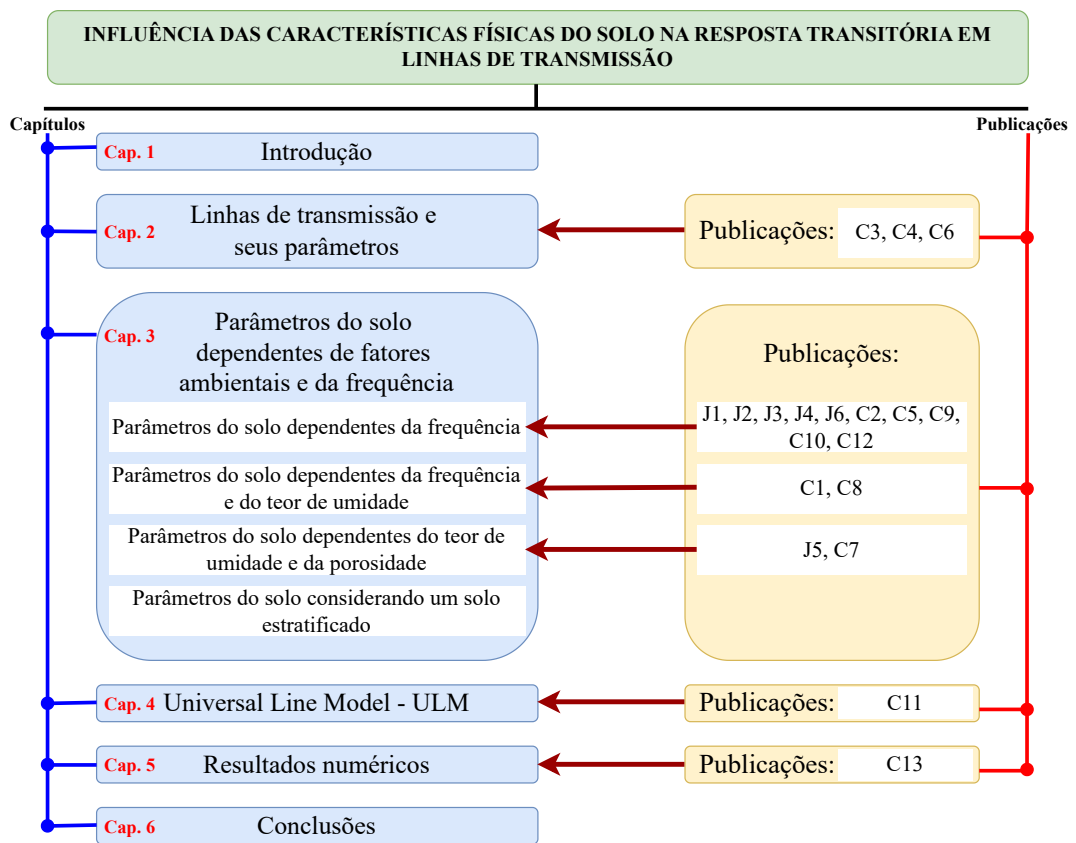
- **C13 - Pascoalato, T. F. G.;** Araújo, A. R. J.; Kurokawa S.; Barros, M. T. C. "*Realistic Soil Modeling in Transient Analysis: Effects of Frequency Dependence, Water Content, Porosity and Stratification on Lightning Overvoltages*", in 16th International Conference on Power Systems Transients (IPST), Guadalajara, México, 2025. SUBMETIDO.

Artigos realizados em colaboração (não relacionados ao tema da tese):

- **P1 - Pascoalato, T. F. G.;** Caballero, P. T.; Kurokawa S. "*Application of the lumped parameter line model to simulate electromagnetic transients in three-phase transmission lines with vertical symmetry*", in IEEE Latin America Transactions, vol. 20, p. 379-385, 2022. PUBLICADO.
- **P2 - Silva, H. F.;** **Pascoalato, T. F. G.;** Kurokawa S. "*Inclusão do Efeito da Frequência em um Método Alternativo de Integração das Equações de Estado de Linhas de Transmissão*", in IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Santa Maria, Brasil, 2022. PUBLICADO.
- **P3 - Pascoalato, T. F. G.;** Araújo, A. R. J.; Kurokawa S.; Pissolato Filho, J. "*Alternative method to include the frequency-effect on transmission line parameters via state-space representation*", in International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 155, p. 109375, 2024. PUBLICADO.
- **P4 - Azevedo, W. L. M.;** **Pascoalato, T. F. G.;** Araújo, A. R. J.; Kurokawa S.; Pissolato Filho, J. "*Effect of Concrete-Encased Grounding System in the Backflashover Performance of Transmission Line*", in 16th International Conference on Power Systems Transients (IPST), Guadalajara, México, 2025. SUBMETIDO.

A estrutura deste documento é apresentada na Figura 3, juntamente com os artigos publicados vinculados a cada capítulo.

Figura 3 - Estrutura da tese com os artigos publicados vinculados a cada capítulo.



Fonte: Autoria própria.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

6.1 Conclusões

Esta tese concentrou-se em avaliar a influência das características físicas do solo (frequência, teor de umidade, porosidade e estratificação) nas respostas transitórias de sistemas de potência submetidos a descargas atmosféricas, utilizando como modelo de linha o ULM, implementado por meio dos softwares MATLAB e ATP-EMTP. Com isso, visou-se obter uma metodologia aprimorada que apresentasse menos limitações, considerando um solo mais realista para as simulações dos transitórios eletromagnéticos.

Para o cálculo dos transitórios eletromagnéticos em uma LT, é necessário determinar os parâmetros dessa linha. Assim, foram apresentados os modelos e métodos para o cálculo das impedâncias longitudinal, interna, externa e do solo e das admitâncias transversal, externa e do solo. Constatou-se que tanto a impedância do solo quanto a admitância do solo possuem diversos modelos para seu cálculo. Esses modelos foram descritos em ordem cronológica. Além disso, foram realizadas simulações desses parâmetros para uma LT monofásica, permitindo concluir e identificar que o modelo mais coerente e com menos limitações para a aplicação prática é o proposto por Wise/Nakagawa.

Nos solos reais, onde as LTs estão localizadas, há a influência de fatores físicos. Desse modo, os parâmetros do solo (condutividade do solo e permissividade relativa) são afetados pela frequência das ondas eletromagnéticas incidentes no solo, bem como por fatores ambientais, como teor de umidade, porosidade e estratificação. Com isso, esses fatores devem ser considerados no cálculo dos parâmetros da LT, e conseqüentemente, nas tensões transitórias. Os modelos e equações propostos na literatura para quantificar a influência desses fatores nos parâmetros do solo e nos da LT também foram apresentados cronologicamente. Adicionalmente, foram realizadas simulações para avaliar a condutividade do solo, permissividade relativa, constante de propagação, impedância e admitância do solo. Os resultados dessas simulações permitiram compreender o comportamento de cada fator físico e determinar a modelagem mais adequada para cada caso. Para considerar os parâmetros do solo dependentes da frequência é a modelagem de Alípio e Visacro, para os dependentes da frequência e do teor de umidade é a de Messier, para a condutividade dependente do teor de umidade e da porosidade é a de Archie/Fu e para o solo estratificado é a de Xue.

O modelo de linha utilizado foi o *Universal Line Model* (ULM), amplamente adotado como referência em estudos de transitórios eletromagnéticos, reconhecido por sua generalidade e precisão (Zanon, 2019). O ULM é desenvolvido diretamente no domínio das fases e utiliza a técnica de ajuste vetorial para ajustar a admitância característica e a função de propagação da linha. Embora disponível em softwares do tipo EMTP, e na versão mais recente do ATP-EMTP, sua implementação não permite, de forma direta, que os usuários ajustem aspectos importantes

do processo, como mudanças nas rotinas de cálculo e a consideração de uma modelagem mais rigorosa e realista do solo. No ULM do ATP-EMTP, a impedância do solo é calculada pela equação de Carson, enquanto as correntes de deslocamento e a admitância do solo são desconsideradas, e a condutividade do solo é tratada como constante. Para fornecer aos usuários uma maneira de contornar essas limitações, Leal, Conti e Zanon (2023) propuseram uma implementação do ULM utilizando o software MATLAB em conjunto com o software ATP-EMTP, descrita e validada no Capítulo 4 desta tese.

Para empregar a metodologia aprimorada e assim analisar a influência das características físicas do solo nas respostas transitórias, foram realizadas simulações considerando uma configuração com duas LTs trifásicas dispostas geometricamente em paralelo. Uma LT de 230 kV com dois cabos para-raios e outra LT de 115 kV, ambas com 10 km de extensão, submetidas a uma incidência de descarga atmosférica. Os resultados foram organizados em quatro subseções: (i) tensões transitórias considerando os parâmetros do solo dependentes da frequência; (ii) tensões transitórias considerando os parâmetros do solo dependentes da frequência e do teor de umidade; (iii) tensões transitórias considerando a condutividade do solo dependente do teor de umidade e da porosidade; (iv) tensões transitórias considerando o solo como estratificado.

As tensões transitórias foram calculadas para duas abordagens. A primeira abordagem, denominada ULM-ATP (usada como referência), emprega a equação de Carson para calcular a impedância do solo, desconsidera as correntes de deslocamento e a admitância do solo, e considera a condutividade do solo como constante, como implementado na versão recente do software ATP-EMTP. A segunda abordagem, denominada ULM-implementado, foi implementada pela autora, conforme descrito no Capítulo 4. Nesta abordagem seguiu-se a metodologia aprimorada, sendo que, a impedância e a admitância do solo foram calculadas pelas equações de Wise/Nakagawa, sendo aprimorada com as seguintes características do solo: (i) parâmetros do solo dependentes da frequência calculados pelas equações de Alípio e Visacro; (ii) parâmetros do solo dependentes da frequência e do teor de umidade calculados pelas equações de Messier; (iii) condutividade do solo dependente do teor de umidade e porosidade calculada pela equação de Archie/Fu; (iv) solo considerado como estratificado calculado pela equação de Xue.

Os resultados mostraram que, em todos os casos, a abordagem ULM-ATP se diferenciou da abordagem ULM-implementado, independentemente da característica do solo considerada (frequência, teor de umidade, porosidade ou estratificação). A abordagem ULM-ATP gerou resultados mais conservadores, com picos de tensão superestimados. Isso ocorre pois, características importantes do solo, como as correntes de deslocamento e a admitância do solo são negligenciadas, e ainda a condutividade do solo é mantida como constante, fazendo com que o solo não seja modelado corretamente. As diferenças entre as abordagens foram mais pronunciadas nas fases induzidas da LT de 115 kV (fases 4, 5 e 6), que como foi explicado é devido a complexidade das interações entre a propagação de ondas eletromagnéticas e o acoplamento

entre as linhas paralelas. As diferenças percentuais de pico chegaram aos valores máximos de 27,2146% para os parâmetros do solo dependentes da frequência; 10,7164% para o parâmetros do solo dependentes da frequência e do teor de umidade; 78,5619% para a condutividade dependente do teor de umidade e da porosidade; 45,9587% para o solo considerado como estratificado. Esses valores são extremamente significativos, demonstrando como a influência das características do solo impacta nas respostas transitórias.

Esta tese demonstrou a importância da modelagem adequada do solo para o estudo de transitórios eletromagnéticos. Concluiu-se que tanto a escolha do modelo para o cálculo da impedância e da admitância do solo, quanto a consideração das características físicas do solo (frequência, teor de umidade, porosidade e estratificação), tornando-o mais realista, são muito importantes e impactam na resposta final dos parâmetros da LT e principalmente nas tensões transitórias da linha. Sendo assim, o conhecimento correto dessas tensões proporciona previsões mais precisas, aumentando a confiabilidade da transmissão, a qualidade da energia elétrica fornecida e a operação adequada do sistema.

Adicionalmente, verificou-se a importância de incluir uma modelagem detalhada do solo em softwares de simulação de transitórios eletromagnéticos (tipo EMTP) e em modelos de linha (como o ULM), destacando-se a necessidade de atualização dessas ferramentas para adotar modelos mais abrangentes e realistas, de forma a assegurar a operação confiável e eficiente dos sistemas de energia elétrica.

6.2 Propostas futuras

Como continuidade deste trabalho, propõe-se a investigação dos seguintes tópicos:

- A inclusão do modelo da torre de transmissão utilizando softwares, como exemplo o ATP-EMTP;
- A incorporação do aterramento da torre, representado por meio da impedância harmônica para solos realistas;
- Estudar novos tipos de solos, como o latossolo que é o de maior representatividade no Brasil, e que em média tem resistividade elevada;
- Incorporar a granulometria do solo;
- Testar a metodologia em novos tipos de softwares;
- Considerar a cadeia de isoladores e o Efeito Corona para as simulações.

REFERÊNCIAS

- ALVARADO, F. L.; BETANCOURT, R. An accurate closed-form approximation for ground return impedance calculations. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, Piscataway, v. 71, n. 2, p. 279–280, 1983.
- ALÍPIO, R.; VISACRO, S. Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, Piscataway, v. 56, n. 5, p. 1163–1171, 2014.
- AMETANI, A. Stratified earth effects on wave propagation-frequency-dependent parameters. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, Piscataway, n. 5, p. 1233–1239, 1974.
- AMETANI, A.; MIYAMOTO, Y.; BABA, Y.; NAGAOKA, N. Wave propagation on an overhead multiconductor in a high-frequency region. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, v. 56, n. 6, p. 1638–1648, 2014.
- ANTONINI, G. Spice equivalent circuits of frequency-domain responses. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, Piscataway, v. 45, n. 3, p. 502–512, 2003.
- ARAÚJO, A. E. D. *Cálculos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.
- ARAÚJO, A. R.; AZEVEDO, W. L.; COLQUI, J. S.; Pissolato Filho, J. Backflashover analysis in power transmission lines located on high-resistive porous soil. In: *IET. 23rd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2023)*. Glasgow, 2023. p. 1–7.
- ARAÚJO, A. R. de; AZEVEDO, W. L. de; Pissolato Filho, J. Study of frequency-dependent soils with water content in transient responses. In: *IEEE. 2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. São Paulo, 2021. p. 535–536.
- ARCHIE, G. E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AIME*, OnePetro, Houston, v. 146, n. 01, p. 54–62, 1942.
- AZEVEDO, W. L. M. de; ARAÚJO, A. R. J. de; COLQUI, J. S. L.; Pissolato Filho, J.; KORDI, B. Transient analysis of power transmission towers above lossy ground with frequency dependent electrical parameters considering the water content of soil. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, Elsevier, Amsterdam, v. 4, p. 100161, 2023.
- AZEVEDO, W. L. M. de; ARAÚJO, A. R. J. de; Pissolato Filho, J. Soil water content and porosity on earth potential rise of vertical grounding rods. In: *IEEE. 2022 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*. Fortaleza, 2022. p. 1–6.
- BAÑUELOS-CABRAL, E. S.; GUTIÉRREZ-ROBLES, J. A.; GUSTAVSEN, B. *Rational fitting techniques for the modeling of electric power components and systems using MATLAB environment*. Croatia: IntechOpen, 2017.
- BATISTA, R.; CAETANO, C.; PAULINO, J.; BOAVENTURA, W.; LOPES, I.; CARDOSO, E. A study of grounding arrangements composed by vertical electrodes for two-layered stratified

- soil models. *Electric power systems research*, Elsevier, Amsterdam, v. 180, p. 106129, 2020.
- BUDNER, A. Introduction of frequency-dependent line parameters into an electromagnetic transients program. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, Piscataway, n. 1, p. 88–97, 1970.
- CABALLERO, P. T. *Inclusion of the frequency dependence in the Bergeron model: representation of short and long transmission lines considering electromagnetic transients resulting from switching operations and lightning strikes*. Tese (PhD thesis) — São Paulo State University (UNESP), Ilha Solteira, 2018.
- CARSON, J. R. Wave propagation in overhead wires with ground return. *The Bell System Technical Journal*, Nokia Bell Labs, Piscataway, v. 5, n. 4, p. 539–554, 1926.
- CAVKA, D.; MORA, N.; RACHIDI, F. A Comparison of frequency-dependent soil models: Application to the analysis of grounding systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, Piscataway, v. 56, n. 1, p. 177–187, 2014.
- CHRYSOCHOS, A. I.; PAPADOPOULOS, T. A.; PAPAGIANNIS, G. K. Enhancing the frequency-domain calculation of transients in multiconductor power transmission lines. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, Amsterdam, v. 122, p. 56–64, 2015.
- CIGRE, C. W. G. *Impact of soil-parameter frequency dependence on the response of grounding electrodes and on the lightning performance of electrical systems*. Paris, 2019. 1–66 p.
- CLARKE, E. *Circuit Analysis of A-C Power Systems*. New York: Wiley, 1943.
- COLQUI, J. S.; MOURA, R. A.; SCHROEDER, M. A. O.; Pissolato Filho, J. Analysis of transmission line parameters considering multilayer soils. In: IEEE. *2022 IEEE XXIX International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*. Lima, 2022. p. 1–4.
- CONSTRUCTOR, T. *Permeability of Stratified Soil Deposits*. 2021. Disponível em: <https://theconstructor.org/geotechnical/permeability-stratified-soil-deposits/29630/>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.
- CONTI, A. D.; EMÍDIO, M. P. S. Simulation of transients with a modal-domain based transmission line model considering ground as a dispersive medium. In: ELSEVIER. *International Conference on Power Systems Transients (IPST 2015)*. Cavtat, 2015. p. 1–8.
- CONTI, A. D.; EMÍDIO, M. P. S. Extension of a modal-domain transmission line model to include frequency-dependent ground parameters. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, Amsterdam, v. 138, p. 120–130, 2016.
- CONTI, A. D.; VISACRO, S. Analytical representation of single-and double-peaked lightning current waveforms. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, Piscataway, v. 49, n. 2, p. 448–451, 2007.
- DANIEL, V. V. *Dielectric Relaxation*. New York: Academic Press Inc., 1967.
- DATSIOS, Z.; MIKROPOULOS, P. Characterization of the frequency dependence of the

- electrical properties of sandy soil with variable grain size and water content. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE, Piscataway, v. 26, n. 3, p. 904–912, 2019.
- DERI, A.; TEVAN, G.; SEMLYEN, A.; CASTANHEIRA, A. The complex ground return plane a simplified model for homogeneous and multi-layer earth return. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, Piscataway, n. 8, p. 3686–3693, 1981.
- DINIZ, F. A.; ALÍPIO, R. S.; MOURA, R. A. R. d. Assessment of the influence of ground admittance correction and frequency dependence of electrical parameters of ground of simulation of electromagnetic transients in overhead lines. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Springer, Berlin, p. 1–15, 2022.
- DUBANTON, C. Calcul approché des parametres primaires et secondaires d'une ligne de transport. *EDF Bull. Direct. Etudes Rech*, Électricité de France (EDF), Paris, v. 1, p. 53–62, 1969.
- EWING, R.; HUNT, A. Dependence of the electrical conductivity on saturation in real porous media. *Vadose Zone Journal*, GeoScienceWorld, Tysons Corner, v. 5, n. 2, p. 731–741, 2006.
- FU, Y.; HORTON, R.; REN, T.; HEITMAN, J. A general form of archie's model for estimating bulk soil electrical conductivity. *Journal of Hydrology*, Elsevier, Amsterdam, v. 597, p. 126160, 2021.
- FUCHS, R. D. *Transmissão de energia elétrica: Linhas aéreas teorias das linhas em regime permanente*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora; Itajubá: Escola Federal de Engenharia, 1979.
- GEO, M. *Embrapa lança mapeamento digital dos solos brasileiros*. 2014. Disponível em: <https://mundogeo.com/2014/09/18/embrapa-lanca-novo-mapeamento-digital-dos-solos-brasileiros/>. Acesso em: 21 de dezembro de 2023.
- GHANBARIAN, B.; HUNT, A. G.; EWING, R. P.; SKINNER, T. E. Universal scaling of the formation factor in porous media derived by combining percolation and effective medium theories. *Geophysical Research*, Wiley Online Library, New Jersey, v. 41, n. 11, p. 3884–3890, 2014.
- GLOVER, P. W. A new theoretical interpretation of archie's saturation exponent. *Solid Earth*, Copernicus GmbH, Göttingen, v. 8, n. 4, p. 805–816, 2017.
- GUSTAVSEN, B. Improving the pole relocating properties of vector fitting. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, Piscataway, v. 21, n. 3, p. 1587–1592, 2006.
- GUSTAVSEN, B. *User's Guide for vectfit3.m*. Trondheim, 2008.
- GUSTAVSEN, B. Optimal time delay extraction for transmission line modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, Piscataway, v. 32, n. 1, p. 45–54, 2016.
- GUSTAVSEN, B.; SEMLYEN, A. Combined phase and modal domain calculation of transmission line transients based on vector fitting. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, Piscataway, v. 13, n. 2, p. 596–604, 1998.

- GUSTAVSEN, B.; SEMLYEN, A. Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, Piscataway, v. 14, n. 3, p. 1052–1061, 1999.
- HE, J.; ZENG, R.; ZHANG, B. *Methodology and technology for power system grounding*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012.
- HEIDLER, F.; CVETIĆ, J. A class of analytical functions to study the lightning effects associated with the current front. *European transactions on electrical power*, Wiley Online Library, New Jersey, v. 12, n. 2, p. 141–150, 2002.
- HOFMANN, L. Series expansions for line series impedances considering different specific resistances, magnetic permeabilities, and dielectric permittivities of conductors, air, and ground. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, Piscataway, v. 18, n. 2, p. 564–570, 2003.
- JAVOR, V. Frequency analysis of the typical impulse voltage and current waveshapes of test generators. *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*, Serbia, v. 36, n. 1, p. 077–089, 2023.
- JI, Y.; MENG, X.; SHAO, J.; WU, Y.; WU, Q. The generalized skin depth for polarized porous media based on the cole–cole model. *Applied Sciences*, MDPI, Basel, v. 10, n. 4, p. 1456, 2020.
- KOU, X.; GUO, L.; ZHANG, K.; DONG, M.; LU, H.; LI, C.; HOU, M.; LIU, Y. Influence of soil structure on coating voltage of buried pipeline when lightning strikes transmission lines. In: IEEE. *2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*. Wuhan, 2021. p. 1–4.
- KUROKAWA, S.; Pissolato Filho, J.; TAVARES, M.; PORTELA, C.; PRADO, A. Behavior of overhead transmission line parameters on the presence of ground wires. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, Piscataway, v. 20, n. 2, p. 1669–1676, 2005.
- LEAL, O. E.; CONTI, A. D.; ZANON, F. O. *USER MANUAL ULM-ATP VERSION 3.2*. Belo Horizonte, 2023.
- LI, Z.; HE, J.; ZHANG, B.; YU, Z. Influence of frequency characteristics of soil parameters on ground-return transmission line parameters. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, Amsterdam, v. 139, p. 127–132, 2016.
- LIMA, A. C. S. D.; PORTELA, C. M. Inclusion of frequency-dependent soil parameters in transmission-line modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, Piscataway, v. 22, n. 1, p. 492–499, 2007.
- LIU, Y.; JIANG, Y.; GAO, Q.; LI, X.; YANG, G.; ZHANG, Q.; TANG, B. Influences of soil water content and porosity on lightning electromagnetic fields and lightning-induced voltages on overhead lines. *Frontiers in Environmental Science*, Frontiers, Lausanne, p. 927, 2022.
- LONGMIRE, C. L.; LONGLEY, H. J. *Time domain treatment of media with frequency-dependent electrical parameters*. Santa Barbara, 1971. Internal report.
- LONGMIRE, C. L.; SMITH, K. S. *A universal impedance for soils*. Santa Barbara, 1975.

Internal report.

LORRAIN, P.; CORSON, D. R.; LORRAIN, F. *Electromagnetic Fields and Waves*. New York: W.H. Freeman and Company, 1988.

MARCANO, F. J. *Modelling of transmission lines using idempotent decomposition*. Tese (PhD thesis) — University of British Columbia, Vancouver, 1996.

MARGITOVÁ, A.; KANÁLIK, M.; KOLCUN, M. Impact of ground wires on the series impedance, voltage and current conditions of overhead power lines. *Acta Electrotechnica et Informatica*, De Gruyter Brill, Berlin, v. 19, n. 1, p. 11–18, 2019.

MARTI, L. Simulation of transients in underground cables with frequency-dependent modal transformation matrices. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, Piscataway, v. 3, n. 3, p. 1099–1110, 1988.

MARTINEZ-VELASCO, J. A. *Power system transients: parameter determination*. Flórida: CRC press, 2009.

MARTINS-BRITTO, A. G.; LOPES, F. V.; RONDINEAU, S. R. M. J. Multilayer earth structure approximation by a homogeneous conductivity soil for ground return impedance calculations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, Piscataway, v. 35, n. 2, p. 881–891, 2019.

MESSIER, M. *The propagation of an electromagnetic impulse through soil: Influence of frequency dependent parameters*. Santa Barbara, 1980. Internal report.

MESSIER, M. *Another soil conductivity model*. Santa Barbara, 1985. Internal report.

MINGLI, W.; YU, F. Numerical calculations of internal impedance of solid and tubular cylindrical conductors under large parameters. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, IET, v. 151, n. 1, p. 67–72, 2004.

MOLINA, F. H.; COELHO, V. L.; RAIZER, A.; LIMA, M. R. de. Mapa de resistividades celesc. In: ABRADÉE. *XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI 2008)*. Pernambuco, 2008. p. 01–09.

MORAES, C. M.; MARTINS-BRITTO, A. G.; LOPES, F. V.; SILVA, K. M.; RIBEIRO, E. P.; RODRIGUES, M. A. On the effects of emi and the soil structure on transmission line parameters—part ii: Impacts on fault locators. In: IEEE. *2021 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*. Belo Horizonte, 2021. p. 1–6.

MORCHED, A.; GUSTAVSEN, B.; TARTIBI, M. A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, Piscataway, v. 14, n. 3, p. 1032–1038, 1999.

MOURA, R. A.; SCHROEDER, M. A.; MENEZES, P. H.; NASCIMENTO, L. C.; LOBATO, A. T. Influence of the soil and frequency effects to evaluate atmospheric overvoltages in overhead transmission line—part 2: The influence of the soil in atmospheric overvoltages. In: ICAE. *Proceedings of XV International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE)*. Norman, 2014. p. 15–20.

- NAKAGAWA, M. Admittance correction effects of a single overhead line. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, Piscataway, n. 3, p. 1154–1161, 1981.
- PAPADOPOULOS, T. A.; CHRYSOCHOS, A. I.; TRAIANOS, C. K.; PAPAGIANNIS, G. Closed-form expressions for the analysis of wave propagation in overhead distribution lines. *Energies*, MDPI, Basel, v. 13, n. 17, p. 4519, 2020.
- PAPADOPOULOS, T. A.; DATSIOS, Z. G.; CHRYSOCHOS, A. I.; MIKROPOULOS, P. N.; PAPAGIANNIS, G. K. Wave propagation characteristics and electromagnetic transient analysis of underground cable systems considering frequency-dependent soil properties. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, Piscataway, v. 63, n. 1, p. 259–267, 2020.
- PETTERSSON, P. Image representation of wave propagation on wires above, on and under ground. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, Piscataway, v. 9, n. 2, p. 1049–1055, 1994.
- PETTERSSON, P. Propagation of waves on a wire above a lossy ground-different formulations with approximations. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, Piscataway, v. 14, n. 3, p. 1173–1180, 1999.
- PHAN, D. C. Reduction of the number of faults caused by lightning for transmission line. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, IAES, Indonesia, v. 9, n. 5, p. 3556–3563, 2019.
- PIĄTEK, Z.; SZCZEGIELNIAK, T.; KUSIAK, D. Electromagnetic field and impedances of high current busducts. In: IEEE. *2010 Modern Electric Power Systems*. Wrocław, 2010. p. 1–6.
- PORTELA, C. Frequency and transient behavior of grounding systems. part i: Physical and methodological aspects. In: IEEE. *IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Austin, 1997. p. 379–384.
- PORTELA, C. Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior. In: IEEE. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Seattle, 1999. p. 1004–1009.
- PORTELA, C. Statistical aspects of soil electromagnetic behavior in frequency domain. In: ICGE. *Ground'2000 - International Conference on Grounding and Earthing*. Rio de Janeiro, 2000. p. 99–104.
- PORTELA, C. Soil electromagnetic behavior in frequency domain and its influence on lightning effects. In: ICGE. *Ground'2002 - International Conference on Grounding and Earthing*. São Paulo, 2002. p. 211–216.
- RACHIDI, F.; NUCCI, C. A.; IANOZ, M. Transient analysis of multiconductor lines above a lossy ground. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, Piscataway, v. 14, n. 1, p. 294–302, 1999.
- RAMOS-LEAÑOS, O.; NAREDO, J. L.; GUTIERREZ-ROBLES, J. A. An advanced transmission line and cable model in matlab for the simulation of power-system transients. In: *MATLAB: A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications*. Rijeka: InTech, 2012. p. 269–304.

- RATCLIFFE, J. A.; WHITE, F. W. G. The electrical properties of the soil at radio frequencies. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Taylor & Francis, Abingdon, v. 10, n. 65, p. 667–680, 1930.
- RHEBERGEN, J. B.; LENSEN, H. A.; SCHWERING, P. B.; MARIN, G. R.; HENDRICKX, J. M. Soil moisture distribution around land mines and the effect on relative permittivity. In: ISOP. *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VII*. Orlando, 2002. v. 4742, p. 269–280.
- RHOADES, J.; RAATS, P.; PRATHER, R. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, Wiley Online Library, New Jersey, v. 40, n. 5, p. 651–655, 1976.
- SALARIEH, B.; De Silva, H. J.; KORDI, B. Electromagnetic transient modeling of grounding electrodes buried in frequency dependent soil with variable water content. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, Amsterdam, v. 189, p. 106595, 2020.
- SALVADOR, J. P. L.; ALÍPIO, R.; LIMA, A. C. S.; BARROS, M. T. Correia de. A concise approach of soil models for time-domain analysis. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, Piscataway, v. 62, n. 5, p. 1772–1779, 2020.
- SCHROEDER, M. A. O.; BARROS, M. T. C. de; LIMA, A. C.; AFONSO, M. M.; MOURA, R. A. Evaluation of the impact of different frequency dependent soil models on lightning overvoltages. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, Amsterdam, v. 159, p. 40–49, 2018.
- SCOTT, J. H. *Electrical and magnetic properties of rock and soil*. Washington, D.C., USA: United States Geological Survey, 1966. Theoretical Notes, Note 18.
- SCOTT, J. H.; CARROLL, R. D.; CUNNINGHAM, D. R. Dielectric constant and electrical conductivity of moist rock from laboratory measurements. *US Department of the Interior Geological Survey Technical Letter*, U.S. Government Printing Office, Washington, v. 17, 1964. Special Projects-12, August.
- SCOTT, J. H.; CARROLL, R. D.; CUNNINGHAM, D. R. Dielectric constant and electrical conductivity measurements of moist rock: A new laboratory method. *Journal of Geophysical Research*, Wiley Online Library, New Jersey, v. 72, n. 20, p. 5101–5115, 1967.
- SEMLYEN, A.; DABULEANU, A. Fast and accurate switching transient calculations on transmission lines with ground return using recursive convolutions. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, Piscataway, v. 94, n. 2, p. 561–571, 1975.
- SHARMA, S.; ISMAIL, M. M.; HITTIARACHHI, P.; COORAY, V.; MIRANDA, F. J. d. Frequency spectra of various events pertinent to lightning cloud flashes obtained from wavelet transform technique and ratified by narrow band measurement technique. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Elsevier, Amsterdam, v. 220, p. 105664, 2021.
- SILVA, B. P.; VISACRO, S.; SILVEIRA, F. H. New approaches to represent the frequency dependence of soil parameters on the time-domain hybrid electromagnetic model (hem-td). *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, Piscataway, v. 65, n. 6, p. 1793–1800, 2023.

- SMITH-ROSE, R. The electrical properties of soil for alternating currents at radio frequencies. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, The Royal Society London, London, v. 140, n. 841, p. 359–377, 1933.
- SOUTHEY, R.; DAWALIBI, F. Improving the reliability of power systems with more accurate grounding system resistance estimates. In: IEEE. *Proceedings. International Conference on Power System Technology*. Kunming, 2002. v. 1, p. 98–105.
- SPIES, B. R. Depth of investigation in electromagnetic sounding methods. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, v. 54, n. 7, p. 872–888, 1989.
- STOLL, R. L. *The analysis of eddy currents*. Oxford: Clarendon Press, 1974.
- STRATTON, J. A. *Electromagnetic theory*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. v. 33.
- STRUTT, N. Measurement of the electrical properties of the earth between 20 and 2 x 10⁷ cycles per second. *Elektrische Nachrichten-Technik*, VDE Verlag, Frankfurt, v. 7, p. 387, 1930.
- SUNDE, E. D. *Earth conduction effects in transmission systems*. New York: Dover Publications Inc., 1968.
- TEIXEIRA, P.; DONAGEMMA, G.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. *Manual of soil analysis methods*. Rio de Janeiro, 2017.
- TERESPOLSKY, B. R.; NIXON, K. J. Developing an approximation to the heidler function-with an analytical transformation into the frequency domain. In: IEEE. *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. Shanghai, 2014. p. 1326–1330.
- TESCHE, F. M. Comparison of the transmission line and scattering models for computing the hump response of overhead cables. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, Piscataway, v. 34, n. 2, p. 93–99, 1992.
- TLEIS, N. *Power systems modelling and fault analysis: theory and practice*. Amsterdam: Elsevier, 2007.
- VISACRO, S. *Aterramentos elétricos*. São Paulo: Artliber, 2002.
- VISACRO, S. *Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia*. São Paulo: Artliber, 2005.
- VISACRO, S.; ALÍPIO, R. Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, Piscataway, v. 27, n. 2, p. 927–935, 2012.
- VISACRO, S.; ALÍPIO, R.; VALE, M. H. M.; PEREIRA, C. The response of grounding electrodes to lightning currents: The effect of frequency-dependent soil resistivity and permittivity. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, Piscataway, v. 53, n. 2, p. 401–406, 2011.
- VISACRO, S.; JR, A. S.; SCHROEDER, M. A. O.; CHERCHIGLIA, L. C.; SOUSA, V. J. de. Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at morro do cachimbo station. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, New Jersey,

v. 109, n. D1, 2004.

VISACRO, S.; PORTELA, C. Soil permittivity and conductivity behavior on frequency range of transient phenomena in electric power systems. In: IEEE. *Proceedings of 1987 International Symposium on High Voltage Engineering*. Braunschweig, 1987. p. 1–4.

WANG, D.; HOU, M.; GUO, Y. Travelling wave fault location of hvac transmission line based on frequency-dependent characteristic. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, Piscataway, v. 36, n. 6, p. 3496–3505, 2021.

WEDEPOHL, L. M.; NGUYEN, H. V. Frequency-dependent transformation matrices for untransposed transmission lines using newton-raphson method. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, Piscataway, v. 11, n. 3, p. 1538–1546, 1996.

WHELAN, E.; HANRATTY, J. M.; MORGAN, B. Earth resistivity in ireland. In: SAFE ENGINEERING SERVICES-SES. *Proceedings of the CDEGS Users' Group*. Toronto, 2010. p. 155–164.

WISE, W. H. Potential coefficients for ground return circuits. *The Bell System Technical Journal*, Nokia Bell Labs, Piscataway, v. 27, n. 2, p. 365–371, 1948.

XUE, H.; MAHSEREDJIAN, J.; AMETANI, A.; MORALES, J.; KOCAR, I. Generalized formulation and surge analysis on overhead lines: Impedance/admittance of a multi-layer earth. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, Piscataway, v. 36, n. 6, p. 3834–3845, 2021.

ZANON, F. d. O. S. *Implementação do modelo ULM na plataforma ATP para o estudo de transitórios em linhas de transmissão aéreas com configuração assimétrica*. Dissertação (Master's thesis) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 2019.

ZANON, F. O.; LEAL, O. E.; CONTI, A. D. *USER MANUAL ULM-ATP VERSION 2.0*. Belo Horizonte, 2021.

ZANON, F. O.; LEAL, O. E.; De Conti, A. Implementation of the universal line model in the alternative transients program. *Electric Power Systems Research*, Amsterdam, v. 197, p. 107311, 2021.

ZHANG, B.; CUI, X.; LI, L.; HE, J. Parameter estimation of horizontal multilayer earth by complex image method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, Piscataway, v. 20, n. 2, p. 1394–1401, 2005.